

# MODELAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS DO PROCESSO DE FURAÇÃO EM LAMINADOS DE CARBONO/EPÓXIDO

Luís M. P. Durão, Daniel J. S. Gonçalves<sup>\*</sup>, Marcelo F. S. F. de Moura<sup>†</sup> and A. T. Marques<sup>†</sup>

<sup>\*</sup> Instituto Superior de Engenharia do Porto/ CIDEM  
Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431, 4200-072 Porto, Portugal  
e-mail: lmdurao@eu.ipp.pt

<sup>†</sup> Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP)  
Universidade do Porto  
Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal

**Palavras - Chave:** Materiais Compósitos, Elementos Finitos, Delaminação.

**Resumo.** Neste trabalho apresentam-se os resultados obtidos em simulações numéricas da furação de laminados de carbono/epóxico usando elementos sólidos tridimensionais do software ABAQUS® Explicit. O início e propagação do dano são simulados recorrendo a instruções específicas do programa, bem como a remoção dos elementos ao longo do processo. Os resultados obtidos numericamente são comparados com resultados experimentais obtidos previamente pelos autores. Verifica-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e os experimentais, confirmando a validade do modelo proposto.

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo da primeira década do século XXI a procura por materiais estruturais mais leves levou a um crescente interesse nos materiais compósitos de matriz polimérica. Das suas características destacam-se o baixo peso, elevada resistência específica e rigidez. Assim, tem sido possível assistir a uma utilização crescente deste tipo de materiais em aplicações em que há alguns anos atrás o seu custo teria sido um obstáculo. Destacam-se as indústrias ligadas ao sector dos transportes, tais como o automóvel ou o ferroviário, para além dos pioneiros sectores aeroespacial e aeronáutico. A crescente capacidade de produção instalada a nível mundial conduziu a um decréscimo do preço, nomeadamente na produção de polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC).

No entanto, estes materiais ainda colocam alguns problemas relacionados com a sua maquinabilidade, nomeadamente a sua natureza laminar e com a abrasividade das fibras de reforço. Assim, e ao contrário do que caracteriza a maquinaria de materiais metálicos, a

maquinagem de compósitos de matriz polimérica obriga à consideração de problemas específicos e do conhecimento dos fenómenos de dano associados à furação: delaminações, arrancamento de fibras, danos térmicos na matriz [1], para além do desgaste prematuro das ferramentas. De todos os danos que podem resultar do processo de furação, o mais grave é a delaminação, separação das camadas adjacentes do laminado, cuja principal consequência é a perda de propriedades mecânicas da placa na zona afectada [2-4].

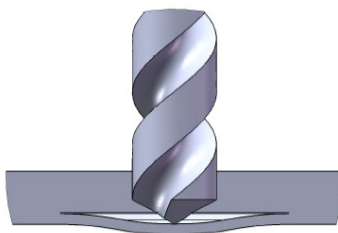


Figura 1: Mecanismo de delaminação.

A aplicação do Método dos Elementos Finitos – MEF – ao estudo da maquinagem de materiais compósitos tem vindo a conhecer um interesse crescente, devido às evidentes vantagens de redução de tempo e custos no estudo dos fenómenos associados. Os primeiros trabalhos publicados abordavam a modelação do corte ortogonal [5, 6]. Outros aspectos têm merecido interesse tais como a remoção de material, os modelos de corte – ortogonal ou oblíquo – ou o mecanismo de formação e separação da aparas [5-11].

Neste trabalho é analisada a furação de laminados carbono/epóxico através do uso de um Modelo de Elementos Finitos. A placa é modelada considerando camadas empilhadas com diferentes orientações, numa sequência que lhe confere propriedades quasi-isotrópicas. A ferramenta – broca – é modelada como um “corpo rígido”. O modelo permite estabelecer comparações de resultados entre diferentes geometrias de ferramentas e diferentes avanços.

Os resultados de força máxima e da curva força/deslocamento durante a furação são comparados com os obtidos experimentalmente e os valores da força axial para o início da delaminação com os valores obtidos por modelos analíticos conhecidos.

## 2 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

O objectivo deste trabalho é o desenvolvimento de um modelo numérico que seja capaz de simular o processo de furação de placas de compósitos laminados. Para tal, foi utilizado o software de elementos finitos ABAQUS®/Explicit, sendo a placa modelada com o formato de um quadrado. Foram considerados elementos prismáticos de 8 nós disponíveis na biblioteca do ABAQUS®, simulando uma placa de dimensões  $100 \times 100 \text{ mm}^2$ . Os elementos estão distribuídos num total de 14 camadas numa sequência de empilhamento equivalente a um laminado cross-ply, originando uma placa com uma espessura final de 2,1 mm, correspondentes a uma espessura de 0,15 mm por camada.

Para as simulações pretendidas, em que a broca adquire um movimento cuja velocidade corresponde à velocidade de avanço da ferramenta, foi utilizada a opção ABAQUS/Explicit.

Esta opção permite uma modelação do dano com múltiplos mecanismos que concorrem para a perda da resistência mecânica. Este modelo de degradação de propriedades baseia-se na mecânica do dano. Para simular a degradação e separação do material foram utilizadas as funções “*Damage initiation*”, “*Damage evolution*” e “*Element deletion*”, todas disponíveis no ABAQUS®. Existem dois critérios para simular a iniciação e a propagação do dano. O primeiro estabelece a condição que deve ser satisfeita para que ocorra a iniciação da degradação progressiva do material. O segundo baseia-se na perda progressiva da rigidez do material até à sua completa rotura. Nesse momento a remoção do material é efectuada através da instrução “*Element deletion*”. Das duas opções disponíveis no programa ABAQUS®, para a perda de rigidez que conduz à rotura, foi escolhida a baseada na acumulação da energia, critério que melhor retrata o mecanismo de dano real.

Para a ferramenta – broca – foi usada a opção ‘corpo rígido’ disponível no ABAQUS®, com o respectivo nó de referência localizado na sua ponta.

### 3 RESULTADOS

Nas figuras seguintes – Figuras 2, 3 e 4 – são apresentados alguns passos do processo de simulação, estando o dano nas placas relacionado com diferentes cores.

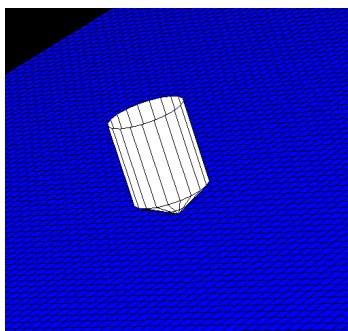


Figura 2 : Início da simulação.

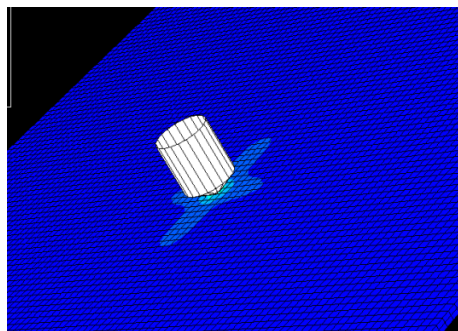


Figura 3 : Início do dano.

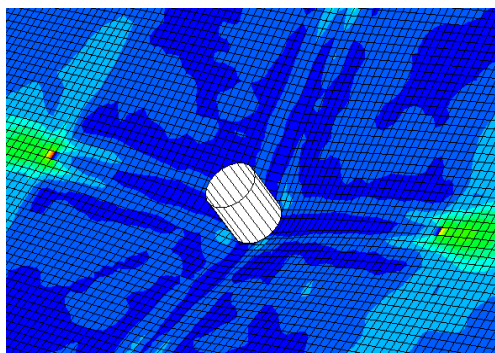


Figura 4 : Placa com dano extenso, imediatamente antes da remoção de material.

Para efeitos de comparação com os resultados experimentais foram registados, em cada simulação, os valores relativos à força máxima durante a furação e a respectiva curva força/deslocamento. A tabela 1 compara os valores de força máxima obtidos com os três diferentes avanços experimentais e com o modelo, aplicando diferentes tempos de percurso da broca através da placa.

| AVANÇO<br>[mm/rot] | FORÇA MÁXIMA [N] |        |
|--------------------|------------------|--------|
|                    | EXPERIMENTAL     | MEF    |
| 0.04               | 88.0             | 111.55 |
| 0.06               | 112.5            | 110.4  |
| 0.12               | 145.2            | 112.8  |

Tabela 1 : Valores experimentais e numéricos de força máxima

De realçar que dos resultados obtidos com modelo numérico é possível observar que a um aumento do avanço corresponde um aumento da força axial máxima, o que corresponde ao conhecimento existente sobre o efeito do avanço nas forças de corte. As forças máximas foram previstas pelo modelo apenas com razoável aproximação em dois casos o que se justifica pelas oscilações pronunciadas verificadas na curva força-deslocamento. A figura 5 mostra a comparação entre as curvas força/deslocamento obtidas numérica e experimentalmente, para um dos avanços seleccionados, neste caso o de 0.06 mm/rot. Note-se a boa concordância entre as duas curvas.

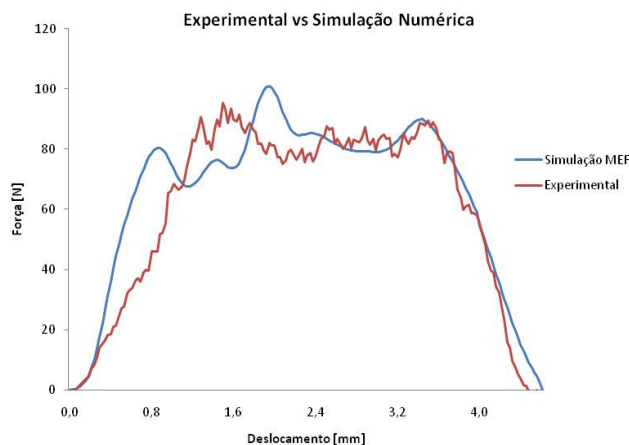


Figura 5 : Comparação das curvas força/deslocamento experimental ( $f=0.06$  mm/rot) e numérica.

Com este modelo pretende-se determinar o valor da força axial para o qual se verifica o início da delaminação com valores obtidos pela aplicação de modelos analíticos conhecidos [12-15].

## 6 CONCLUSÕES

Foi apresentado um modelo de simulação do processo de furação de laminados carbono/epóxico utilizando elementos finitos tridimensionais. Estes elementos sólidos, disponíveis no programa ABAQUS<sup>®</sup>/Explicit, mostram-se adequados para a modelação do dano nas camadas de laminado. Os resultados obtidos com o modelo numérico podem ser comparados com modelos analíticos existentes e com resultados obtidos experimentalmente.

Com base no trabalho aqui descrito, é possível extrair algumas conclusões:

- a forma da curva força/deslocamento obtida numericamente é similar às curvas obtidas experimentalmente;
- o efeito da variação do tempo para o percurso definido para a broca, e consequentemente a velocidade de avanço, tem um efeito idêntico ao experimental;
- os valores do modelo para a força axial máxima durante a furação apresentam razoável concordância com os valores experimentais;
- o modelo numérico permite simular a furação de placas carbono/epóxico;
- os resultados deste modelo poderão servir para determinar o início da delaminação, aspecto que não é possível de realizar num ensaio experimental.

Prevemos que este modelo possa ser aplicado a outros tipos de laminados como os vidro/epóxico e os híbridos com camadas com diferentes tipos de reforço.

## REFERÊNCIAS

- [1] Wern, C.W.; Ramulu, M., Schukla, A., Investigation of Stresses in the Orthogonal Cutting of Fiber-Reinforced Plastics, *Experimental Mechanics*, 33 – 41 (1994).
- [2] Abrate, S., Machining of Composite Materials, *Composites Engineering Handbook*, Ed. P. K. Mallick, Marcel Dekker, New York, 777-809 (1997).
- [3] Persson, E., Eriksson, I., Zackrisson, L., Effects of Hole Machining Defects on Strength and Fatigue Life of Composite Laminates, *Composites A*, 28, 141-151 (1997).
- [4] Persson, E., Eriksson, I., Hammersberg, P., Propagation of hole machining defects in pin-loaded composite laminates, *Composites A*, 31, 383-408 (1997).
- [5] Arola, D., Sultan, M. B., Ramulu, M., Finite element modelling of edge trimming fiber reinforced plastics, *J. of Manufacturing Science & Engineering*, 124, 32-41 (2002).
- [6] Sicot, O., Gong, X. L., Cherouat, A., Lu, J., Determination of residual stress in composite laminates using the incremental hole-drilling method, *J. of Composite Materials*, 37, 831-844 (2003).
- [7] Mackerle, J., Finite element analysis and simulation of machining: an addendum. A bibliography (1996-2002), *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, 43, 103-114 (2003).
- [8] Mahdi, M., Zhang, L., An adaptive three-dimensional finite element algorithm for the orthogonal cutting of composite materials, *J. Materials Processing Technology*, 113, 368-372 (2001).
- [9] Mahdi, M., Zhang, L., A finite element model for the orthogonal cutting of fiber-reinforced composite materials, *J. Materials Processing Technology*, 113, 373-377 (2001).

- [10] Durão, L. M. P., de Moura, M. F. S. F., Marques, A.T., Numerical simulation of the drilling process on carbon/epoxy composite laminates, *Composites A*, 37, 1325-1333 (2006).
- [11] Durão, L.M.P., de Moura, M.F.S.F., Marques, A.T., Numerical prediction of delamination onset in carbon/epoxy composites drilling, *Engineering Fracture Mechanics*, 75, 2767-2778 (2008).
- [12] Hocheng, H., Dharan, C. K. H., Delamination during drilling in composite laminates, *J. of Engineering for Industry*, v. 112, p. 236-239 (1990).
- [13] Lachaud, F., Piquet, R., Collombet, F., Surcin, L., Drilling of composite structures, *Composite Structures*, 52, 511-516 (2001).
- [14] Zhang, L-B., Wang, L-J., Liu, X-Y, A mechanical model for predicting critical thrust forces in drilling composite laminates, *Proc Instn Mech Engrs*, 215 Part B, 135-146 (2001).
- [15] Jung, J. P., Kim, G. W., Lee, K.Y., Critical thrust force at delamination propagation during drilling of angle-ply laminates, *Composite Structures*, 68, 391-397 (2005).